Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú

• Edwin Pino* • Principe Tacora • André Steenken • Luis Alfaro •
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú
*Autor para correspondencia

• Angely Valle •
Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

• Eduardo Chávarri • David Ascencios • Jesús Mejía •
Universidad Nacional Agraria, Lima, Perú

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-06

Resumen

Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Alfaro, L., Valle, A., Chávarri E., Ascencios D., & Mejía, J. (noviembre-diciembre, 2017). Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), 77-99, DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-06.

Se busca determinar la calidad del agua en la cuenca Caplina tomando como componentes principales el análisis de la geomorfología, geología, medio ambiente e hidrología. Para ello, se tomaron los estudios realizados por el Proyecto Especial Tacna (PET), Autoridad Nacional del Agua (ANA), Autoridad Local del Agua (ALA), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), entre otros. Se identificaron tres unidades geomorfológicas, tales como: la Cordillera Occidental, Puna y Flanco Disectado de los Andes con sus características propias; asimismo en base a la cartografía geológica se identificó las formaciones geológicas que inciden sobre la calidad del agua en la Cuenca Caplina. Se determinaron las fuentes con mayor influencia sobre la calidad del agua, siendo las geotermales Aruma y Paralocos que emanan aguas con alto contenido de Arsénico, Plomo y Sodio en concentraciones por encima de los valores del Estándar de Calidad Ambiental (ECA), incluso el trasvase de aguas de la fuente Barroso Chico hacia la Quebrada Ancoma con alto contenido de Hierro. Se identificó las interrelaciones entre la geología, el clima y la hidrología los cuales reflejan la variación de la concentración de los elementos en el agua en épocas de estiaje y épocas de avenida.

Palabras clave: calidad de agua, cuenca Caplina, geología, geomorfología, hidrología.

Abstract

Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Alfaro, L., Valle, A., Chávarri E., Ascencios D., & Mejía, J. (November-December, 2017). Effect of environmental and geological characteristics on water quality in the Caplina River Basin, Tacna, Peru. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 8(6), 77-99, DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-06.*

This work is aimed at determining the water quality in the Caplina basin using a principal components analysis of the geomorphology, geology, environment, and hydrology. To this end, several studies were used, including: Tacna Spatial Project (PET, Spanish acronym) National Water Authority (ANA, Spanish acronym), Local Water Authority (ALA, Spanish acronym), and the National Weather and Water Service (SENAMHI, Spanish acronym), among others. Three geomorphological units were identified: the Western Cordillera, Puna, and the Andes dissected flank with its own characteristics. In addition, the geological formations that affect the water quality of the Caplina Basin were identified based on the geological cartography. The sources with the greatest influence on water quality were determined. These included the Aruma and Paralocos geothermal springs which produce water with high contents of arsenic, lead, and sodium, in concentrations exceeding the Environmental Quality Standard (ECA, Spanish acronym), and high iron concentration in the water channel from the Barroso Chico spring to the Ancoma Creek. The relationships among the geology, climate, and hydrology were identified, which reflect changes in the concentrations of the elements in the water during seasons with low water levels versus those with high levels.

***Keywords**: Water quality, Caplina basin, geology, geomorphology, hydrology.*

Recibido: 27/09/2016
Aceptado: 01/06/2017

Introducción

Un caso recurrente es realizar estudios de una cuenca hidrográfica con fines de aprovechamiento del recurso hídrico para distintos usos. En la región Tacna, ubicada al sur del Perú, se tiene escasez hídrica, por ello es imprescindible realizar distintos tipos de estudios y cobra aún más importancia el de calidad de agua, en el sentido de que la zona de estudio es deficitaria en volúmenes y, a su vez, el agua disponible es de mala calidad para las actividades económicas.

La calidad de agua es influenciada por la geología que la alberga, es decir, por la interacción del ciclo hidrológico y las temperaturas elevadas el océano se evapora y estas nubes son transportadas por los vientos hacia la Cordillera, se condensa, y después precipita por diferencia de presión atmosférica y cambios de temperatura.

La calidad de agua resultante en la salida de la cuenca depende de la geología, geomorfología y variación del clima. Las fuentes hidrotermales producto de la actividad tectónica también marcan una notable influencia debido a los aportes de elementos contaminantes, tales como arsénico, hierro, boro, aluminio, etcétera, al curso de río Caplina. Las lluvias que precipitan caen sobre distintas litofacies; asimismo, el agua, con su poder de ataque erosivo, actúa sobre las rocas y los sedimentos, originando erosión; dichos fragmentos son transportados a lo largo del cauce del río. En este transcurso ocurre el fenómeno de disolución, es decir, los elementos que conforman los sedimentos se combinan con el agua y surge un nuevo producto, dando como resultado una determinada calidad de agua (Catalan, 1981); por lo tanto, el estudio es de tipo descriptivo. Para este tipo de fenómeno se hace mediante un análisis triple, considerando los componentes principales, como precipitación, geología y proceso respuesta.

La importancia de la geología del terreno por donde atraviesa el agua es indispensable, ya que de las características del mismo dependerá en gran parte la composición química del agua (Barba, 1996). Los factores constitutivos de un río son la pluviometría, que aporta el agua que llevará el río, y la cuenca vertiente, que recoge el agua de lluvia y la conduce a la parte más baja del valle, donde discurrirá sobre las litofacies que forman la estructura del río. Es durante este discurrir cuando el agua produce su ataque mecánico (erosión) y químico (hidratación, hidrólisis, óxido reducción, etc.), provocando la disolución de las rocas. Se concluye que la presencia de metales pesados obedece a diversos orígenes: zinc y cobre por causas naturales (mineralizaciones en las partes altas de la cuenca) y el resto de elementos por causas tanto naturales como artificiales (vertidos de origen urbano, industrial y de la planta potabilizadora, etc.).

Los procesos implicados en la formación y composición del suelo en una zona determinada influyen de manera considerable en la composición tanto del agua superficial como subterránea (Garranzo, 2009). Por tanto, la composición de un agua va a depender de modo fundamental del material por el que circule y con los que está en contacto.

Una manera de evaluar la relación calidad agua-alteración de roca consiste en calcular el aporte de la precipitación a partir de la concentración de un parámetro conservativo (inerte) en la lluvia y el agua subterránea (Appelo & Postma, 1993).

El mantenimiento de la calidad de agua y la preservación de sus usos requiere del conocimiento de su variabilidad temporal y espacial para poder caracterizar la situación ambiental reinante y su posible evolución. Las características de los sistemas acuáticos reflejan no sólo el impacto de la polución a escala local y regional, sino también el cambio global del ambiente, además de ser uno de los factores imperativos del desarrollo sustentable (Meybeck, 1996).

De estudios realizados por PET (PET, 2002), la temperatura en la cuenca Caplina varía entre 18.3 °C en la costa y 3.3 °C en la Puna; en la zona se presenta una serie de variaciones térmicas de acuerdo con los pisos altitudinales existentes. Las temperaturas máximas extremas promedio varían de 20 a 24 °C. Las temperaturas mínimas

• ISSN 0187-8336

extremas promedio varían de 0.8 a 14 °C. La precipitación media anual varía de 10 mm en la zona costera hasta 240 mm en la zona alta.

En la cuenca Caplina se inventariaron 42 surgencias de manantiales que se ubican por lo general en la parte alta y son controladas estructuralmente por fallas, fisuras y contactos litológicos; los cursos subterráneos se calientan a veces por el contacto con rocas ígneas, por la circulación profunda y/o cercanía a una cámara magmática, y afloran como aguas termales (Peña, Acosta, & Cotrina, 2009). Se identificaron tres fuentes de aguas termales en los sectores de Calientes, Piscullane y Aruma, presentando temperaturas superiores a 20 °C. Asimismo, se inventariaron 23 manantiales, donde se tomaron medidas de control de calidad de agua, así como en las quebradas cercanas al afloramiento de agua. La totalidad de los manantiales discurre de forma directa al cauce del río Caplina.

La ANA (ANA, 2011) realizó el monitoreo de calidad de agua en la cuenca Caplina, en la que encontraron valores de elementos que exceden los estándares de calidad de agua (ECA). Los ECA para aguas pertenecen a la categoría de cada cuerpo de agua superficial establecida de acuerdo con la RH N° 202-2010-ANA: "Clasificación de los Cuerpos de Aguas Naturales", y el artículo 3, inciso 3.3 del DS 023-2009-MINAM: "Asignación de Categoría para los Cuerpos de Agua". El monitoreo fue en las quebradas Picullane, Aruma, Ancoma, Toquela y río Caplina.

De los resultados de muestreo de agua y sedimentos en la quebrada Ancoma, aguas arriba del puente Ancoma, nacientes de la quebrada Cotañane, se registró la presencia de sulfatos, aluminio, arsénico, cobalto, hierro y manganeso, que exceden los valores de ECA agua categoría 3 (Esquivez, 2014) . En sedimentos se encontró que el arsénico y cadmio exceden el valor de la guía PEL (Nivel de Efecto Probable) y valor de la guía ISQG (Guía Provisional para Sedimentos de Aguas Dulces). En el puente Caplina se detecta que el plomo excede solamente el valor de la guía ISQG de la norma canadiense, cuyos orígenes se deben en particular a los suelos mineralizados de composición ferromagnesiano, además de los ácidos orgánicos presentes en afloramientos geotermales provenientes del volcán Barroso. Entre los años 2000 y 2005 se identificaron las principales unidades hidrográficas que sufrieron degradación de la calidad del agua; entre 2006 y 2010 se registraron casos donde se mantuvo el nivel de contaminación; pero entre 2011 y 2012 se evidenció una mejora de la calidad del agua en algunas cuencas.

El Perú posee una vasta riqueza natural mineralógica por las condicionantes geológicas que inciden en la calidad de los recursos hídricos; sumando las acciones transformadas que ejercen los humanos sobre el ambiente pueden ocasionar impactos positivos o negativos que alteran la calidad de los cuerpos naturales de agua continentales y marino costero debido a las actividades productivas y poblacionales. Una primera aproximación sobre indicios de contaminación se obtuvo recopilando información de la calidad del agua durante los años 2000 al 2012, con lo cual se logró establecer una base con un total de 64 030 datos de 331 monitoreos en 59 unidades hidrográficas. Para la evaluación de la calidad del agua se consideraron los parámetros físicos y químicos (pH, conductividad eléctrica y demanda bioquímica de oxígeno), microbiológico (coliformes termotolerantes), metaloides (arsénico) y metales (mercurio, cadmio, plomo, hierro y cobre) debido a su uso como indicadores ambientales y su impacto a los cuerpos naturales de agua. Además, se tuvieron en cuenta los usos de agua de acuerdo con la clasificación de los recursos hídricos establecida en el marco del Decreto Ley núm. 1152-2005-DIGESA/SA; así como la Ley núm. 29338, Ley de recursos hídricos actualmente vigente (Cardenas, 2016). Los resultados de la calidad del agua del periodo 2000-2012 determinaron que los parámetros coliformes termotolerantes, arsénico, plomo y cadmio asociados con las descargas de aguas residuales poblacionales, pasivos ambientales mineros, minería informal y características hidrogeológicas mostraran niveles de afectación a los recursos hídricos para fines de riego (en tres vertientes) y para uso poblacional (Vertiente del Pacífico y Amazonas).

ISSN 0187-8336 •

Según los monitoreos realizados hasta el año 2014, Esquivez (2014) identificó 41 cuencas hidrográficas, cuyos parámetros exceden los ECA para agua; se evidencia que la principal causa de afectación de los cuerpos de agua en el país es el vertimiento de aguas residuales domésticas y municipales, que modifican o alteran la calidad de agua con bacterias fecales, materia orgánica, amoníaco, nitritos y otros parámetros que no permiten su uso en agricultura, producción de agua potable y conservación del ambiente acuático, entre otros. Asimismo, se han determinado los factores que influyen en la calidad del agua, como el antropogénico, que comprende las actividades poblacionales y productivas que usan el agua desde su fuente natural y generan vertido de aguas residuales no tratadas. El deterioro de la calidad de agua es influenciado por el vertimiento de aguas residuales no tratadas, manejo inadecuado de los residuos sólidos, agroquímicos en la agricultura, minería informal y pasivos ambientales. A esto se suma el factor natural, sin la intervención de los humanos, donde la alteración de la calidad de agua es influenciado por la geología que alberga dicha cuenca hidrográfica, condicionantes climáticas, hidrología y fenómenos naturales.

En tal sentido, se pretende efectuar la caracterización ambiental y geológica, para explicar la calidad del agua resultante en la cuenca hidrográfica del río Caplina, para lo cual hemos se generó la cartografía geológica a partir de información de INGEMMET (Acosta, Mamani, Alvan, & Oviedo, 2011) y en contraste con el trabajo realizado en campo. En cuanto a la cartografía geomorfológica de la cuenca hidrográfica, fue generada en su totalidad, reflejando la disposición espacial de los elementos y unidades más significativas, para determinar su relación con la calidad de agua. Se caracteriza la cuenca Caplina hidrológica y climatológicamente, y se estudia la interrelación existente entre estos componentes.

Metodología

La metodología establecida surge de la necesidad de analizar las interrelaciones entre el ambiente, geología y calidad de agua. Esta filosofía integrada, en la que se estudia el sistema mediante un triple análisis geológico, dinámico (hidrológico-climático) y proceso-respuesta (interacciones externas, entre ellas la calidad del agua resultante), es precisamente en la que se enmarca este trabajo. En tal sentido, la caracterización ambiental y geológica permitirá explicar la calidad de agua resultante en la cuenca hidrográfica del río Caplina.

Recopilación de información y fuente de datos

En los últimos años se han realizado estudios respecto a la calidad de agua en la cuenca Caplina, a cargo de entidades públicas y privadas, como el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), Autoridad Nacional del Agua (ANA), Gobierno Regional Tacna (GORE) y Proyecto Especial Tacna (PET). Se efectuó trabajo de campo para verificar la información geológica, hidrológica y de calidad de agua por evidencias sobre la existencia de flora y fauna.

Descripción del área de estudio

Tacna se ubica en la cabecera del desierto de Atacama, por lo que la cuenca Caplina presenta un clima desértico (figura 1); por esta razón, las precipitaciones anuales son escasas y hasta nulas. Las mayores precipitaciones registradas en las estaciones de Palca y Toquela alcanzaron hasta 129 mm por año. La precipitación anual media en la zona de Bocatoma de Challata es de 70 mm, 150 mm en Ataspaca, 160 mm en Ancoma y la unidad geomorfológica Cordillera Occidental presenta mayores valores de precipitación entre 220 y 350 mm por año, en la cabecera de la cuenca, Caplina. La precipitación que genera escorrentía se da en esta unidad geomorfológica Cordillera, y dado que en esta unidad geomorfológica se encuentra el grupo Barroso, que presenta minerales de origen volcánico, ricos en arsénico, boro, hierro, aluminio y manganeso, esta condicionante climática es muy variable, alcanzando temperaturas mínimas de -15 °C en invierno; la radiación solar

• ISSN 0187-8336

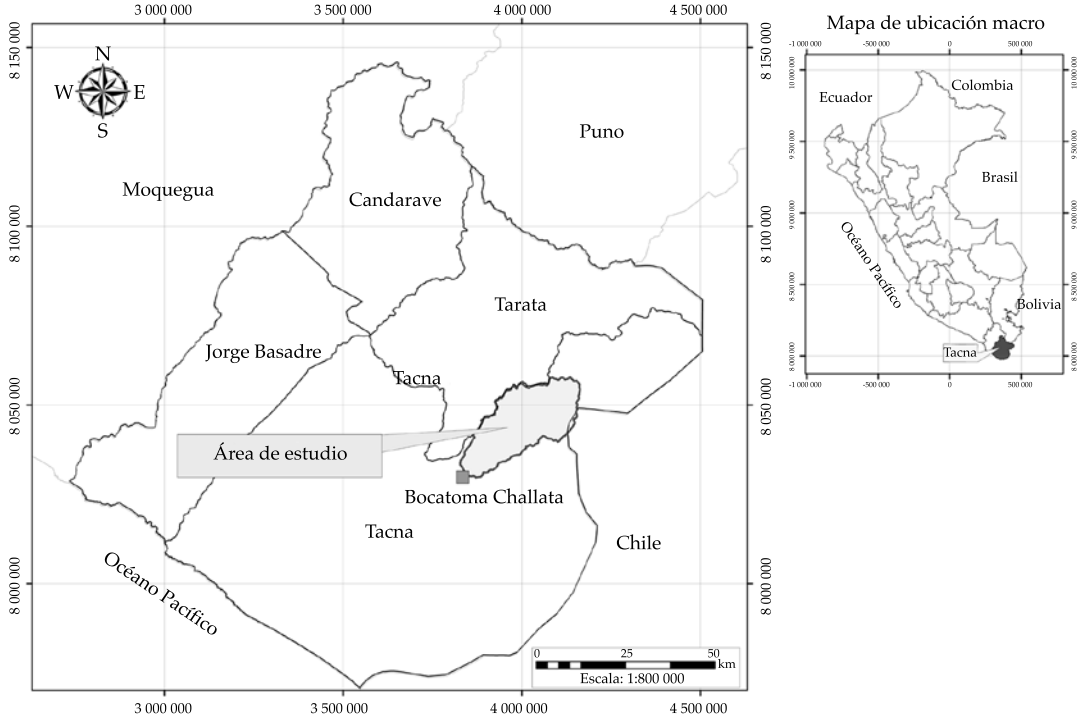

Figura 1. Ubicación de Tacna y la cuenca Caplina.

de día hace que la roca se altere y sea más susceptible a la meteorización y erosión fluvial. Por esta razón, el agua que precipita se combina con los sedimentos producto de la erosión con alto contenido de azufre, cobre y otros metales, que constituyen una fuente natural de contaminación del río Caplina. Además de presentar metales sulfurados, disminuye el pH del agua y hace que el agua tenga mayor poder de disolución. La temperatura presenta poca variabilidad interanual, una media anual de 12 °C a los 3 000 msnm, con máximas de 22 °C en verano y mínimas de 4 °C en invierno; mientras que para altitudes mayores a 4 000 msnm la media alcanza los 3 °C, máximas de 20 °C en verano y mínimas de -15 °C en invierno (SENAMHI, 2012).

Geología y estratigrafía

La información geológica de la zona de estudio fue obtenida de diferentes autores, la cual sirvió de base para este trabajo, siendo una de las referencias más importantes INGEMMET (Wilson & García, 1962), y Proyecto Especial Tacna (PET, 2002). Esta información se contrastó en la etapa de campo, incluyendo análisis de información recopilada, observación directa, medición y análisis de datos, con apoyo de instrumentos electrónicos para procesamiento y tratamiento de la información, como GPS y brújula.

A continuación se describen las formaciones geológicas en el área de estudio:

Estratigrafía

a) *Paleozoico: Triásico*

Formación Machani (Trs-ma): litológicamente describen que la base está conformada por conglomerados subredondeados a redondeados de rocas retrabajadas de gneises, seguida de una secuencia continua en la que se intercalan limolitas negras fisibles, con areniscas cuarzosas gris

ISSN 0187-8336 •

oscura de grano fino a medio en capas delgadas a medianas y de forma tabular . En la parte media de la secuencia se intercalan predominantemente areniscas pardas oscuras a gris claro de grano fino a medio con capas medianas de lutitas negras. La secuencia superior está constituida por una intercalación de areniscas pardas amarillentas en capas medianas con limolitas oscuras muy marginales y algunos niveles de areniscas calcáreas en capas medianas, calizas y conglomerados. El espesor de la unidad se estima en 1 200 m. Esta formación geológica aflora en la zona donde confluyen el agua de las quebradas Cotañane y Caplina (Monge & Cervantes, 2000).

b) *Mesozoico: Jurásico Inferior*

- Volcánico Chocolate (Ji-ch)

El volcánico Chocolate, también conocido como volcánico Junerata, se ubica en la unidad geomorfológica Flanco Disectado, parte central de la cuenca del río Caplina (figura 11), y se presenta como base de toda la pila sedimentaria. Este volcánico sobreyace a la formación sedimentaria del grupo Yura e infrayace en contacto erosivo a la formación Pelado, las cuales se pueden observar en los cerros Ancocalani y Yerbabuenani (Acosta *et al*., 2011). Litológicamente está compuesta de una serie de coladas basálticas que en algunos niveles se encuentran interestratificadas con bancos de sedimentos.

- Formación Pelado (Ji-pe)

Se cuenta con una sección tipo en el cerro Pelado, ubicado al este de poblado de Palca. Esta formación está emplazada en la unidad geomorfológica Flanco Disectado de los Andes y se observa además en Palquilla y en el sector de Tres Cruces al norte de San Francisco. Se tiene sobreyaciendo a las rocas volcánicas de la formación Junerata (Wilson & Garcia, 1962). Dicha formación geológica está constituida por caliza gris clara, silicificada, lutitas calcáreas, caliza arenosa y conglomerados de guijarros volcánicos de color marrón oscuro, como se muestra en la figura 2a. Esta formación se puede observar en los cerros Sino, Actus y parte del Noreste del Cerro Yerbabuenani, en evidente contacto erosivo y es cortada por el río Caplina en un tramo menor.

- Jurásico Medio-Inferior

Formación Socosani (Jm-so): esta formación, anteriormente fue llamada formación San francisco y fue descrita por Wilson y García (1962), quienes describieron algunos centenares de metros de arenisca, lutitas y calizas. La formación San Francisco está en la unidad geomorfológica flanco disectado de los Andes y suprayace a la formación Pelado con un contacto erosivo, e infrayace a la formación Ataspaca. Las aguas que circulan sobre esta formación geológica corresponden a la quebrada Ataspaca y río Caplina, y es cruzada transversalmente por la falla Incapuquio.

- Jurásico Medio-Superior

Grupo Yura (JK-yu): esta formación fue estudiada por Wilson y García (1962) en la quebrada Chachacumane, donde describieron areniscas pardas, lutitas oscuras y calizas grisáceas, interestratificadas en capas delgadas. La formación Ataspaca suprayace a la formación San Francisco e infrayace a la formación Chachacumane (figura 11). Parte de esta formación también aflora al noreste de pueblo de Ataspaca, encontrándose entre las unidades geomorfológicas flanco disectado de los Andes hasta la zona donde empieza la unidad geomorfológica Puna y se encuentra en la cuenca húmeda. El grupo Yura ha sido descrito con las formaciones Puente, Cachios, Labra, Gramadal y Hualhuani en sucesiones cronológicas, donde el espesor de tales sucesiones es muy difícil de estimar debido a la intensa actividad tectónica (Acosta *et al*., 2011); por lo general tal formación sedimentaria está constituido por lutilas, limolitas y cuarcitas con escasas areniscas.

• ISSN 0187-8336

- Mesozoico-Cenozoico

Cretáceo Superior-Eoceno Inferior
Jurásico Superior-Cretácico Inferior

Formación Toquepala (KPp-to): esta formación geológica se encuentra en la unidad geomorfológica denominada flanco disectado de los Andes. Un 30% del río principal de la cuenca Caplina discurre a través de esta formación y aflora en las quebradas Pulaca, Chañal, Escalera, en el cerro Elintana y Pallagua; también se puede observar hacia el oeste del centro poblado Ancoma y la naciente de la quebrada Chari. La relación con la formación Chachacumane que le subyace es discordante.

c) ***Cenozoico***

Oligoceno

Formación Huilacollo (Pe-hui): su afloramiento típico se encuentra ubicado en la unidad geomorfológica Puna. Se localiza en el cerro Huilacollo y en los cerros adyacentes, como Cabacollo, Andamarca, Llaullacane, Quilla, Pantatire (figuras 10 y 11). El agua de las quebradas Achacauha, Tirata, Aruma, Chillauani y Piscullane discurren sobre esta formación geológica, la cual aporta arsénico, boro, aluminio, etcétera, al río Caplina, provenientes de la quebrada Aruma, donde se encuentra una fuente geotermal; parte de esta formación geológica presenta una alteración hidrotermal, tal como se observa en las figuras 2b y 2c.

Está constituido por brechas andesíticas, tobas dacíticas y riodacíticas con buena estratificación; a algunos niveles se les puede considerar como areniscas tobáceas, los que infrayacen de forma ligera y disconforme a la formación Huaylillas; hacia el norte hay depósitos fluvioglaciares, en discordancia angular a los volcánicos del complejo fisural Barroso (Wilson & García, 1962). El espesor de la unidad varía de 200 a 1000 m y se observa hacia el oeste de la quebrada Piscullane; sobre esta misma formación discurre el agua de la quebrada Cocavira, que aporta sedimentos de esta formación al agua de la quebrada Toquela.

- Formación Moquegua Superior (Po-mos)

Se ubica en la unidad geomorfológica flanco disectado de los Andes, donde no se cuenta con precipitación, salvo lluvias esporádicas (fenómeno de El Niño) y aflora en las laderas de los valles, sobreyaciendo en discordancia erosional a estratos Jurásicos-Cretácicos, e infrayaciendo a los volcánicos de la formación Huaylillas. La formación Moquegua superior está conformada principalmente por materiales detríticos, en particular conglomerados que disminuyen en tamaño de grano hacia el suroeste (Acosta *et al*., 2011).

d) *Neógeno Mioceno*

Formación Huaylillas (Nm-hu): formación ubicada en la unidad geomorfológica flanco disectado. Se observa suprayaciendo a la formación Moquegua superior y en discordancia con estratos Mezosoicos en la región noreste, en el cerro Gangolar al noroeste de la quebrada. En esta unidad se distinguen dos miembros, que han sido levantados en el cerro Chuschuco. El miembro inferior está compuesto por tobas rosáceas con abundantes fragmentos de líticos y fragmentos de pómez, los cuales están intercaladas con niveles de conglomerados con clastos de rocas sedimentarias subredondeadas, con matriz de areniscas cuarzo-feldespáticas de color verde; presenta canales de areniscas (Wilson & García, 1962); la parte inferior de la formación Huaylillas está restringida a la zona del cerro Chuschuco y Precipicio.

El miembro superior comprende una sucesión de tobas riolíticas y riodacíticas, de color rosáceo, con fragmentos de pómez y líticos, intercalados con delgados niveles de areniscas masivas de color verde. Estas tobas tienen gran espesor al este de la región, hacia territorio chileno. El espesor de la unidad varía entre 50 y 600 m, disminuyendo de norte a sur y de este a oeste por lo general; es decir, cuanto más cerca

ISSN 0187-8336 •

se encuentre al mar, en la quebrada del río Caplina, los espesores de la formación Huaylillas son cada vez más delgados.

e) *Neógeno Plioceno y Pleistoceno*

- Grupo Barroso (NQ-ba)

Este grupo se encuentra en la unidad geomorfológica Cordillera Occidental, naciente de la cuenca Caplina. Está formado por un complejo volcánico, al que le dieron el nombre de volcánico Barroso, que se puede apreciar en los cerros Culiculine, Chillahuani, Lerco, Toquela, Charaque, Churrivicho, Achacollo, Ancochaullani, Huancune, Chupiquiña y El Fraile.

Está constituido por bancos bien definidos de tobas y lavas de composición traquítica (figura 2d), con cantidades menores de andesita. Típicamente la roca es una traquita grisácea con fenocristales de sanidina y cristales microscópicos de biotita. Las tobas predominan sobre las lavas, y localmente contienen mucho material clástico que da a la roca una textura terrosa; en parte de esta formación geológica hay zonas de alteración hidrotermal (figura 11).

El grupo Barroso ha sufrido una glaciación intensa y está cubierto por depósitos fluvioglaciares. Sobre este grupo se encuentra la quebrada Piscullane, que entrega su agua a los ríos Caplina, Toquela y Pachaza, que discurren hacia la quebrada Cotañane (figura 3a). Entre los nevados Huanacune y El Fraile, ubicados en el abra Paso del Viento, por donde atraviesa la carretera Tacna, Alto Perú, Bolivia y Chile (Tripartito), se diferencia un nivel de brechas

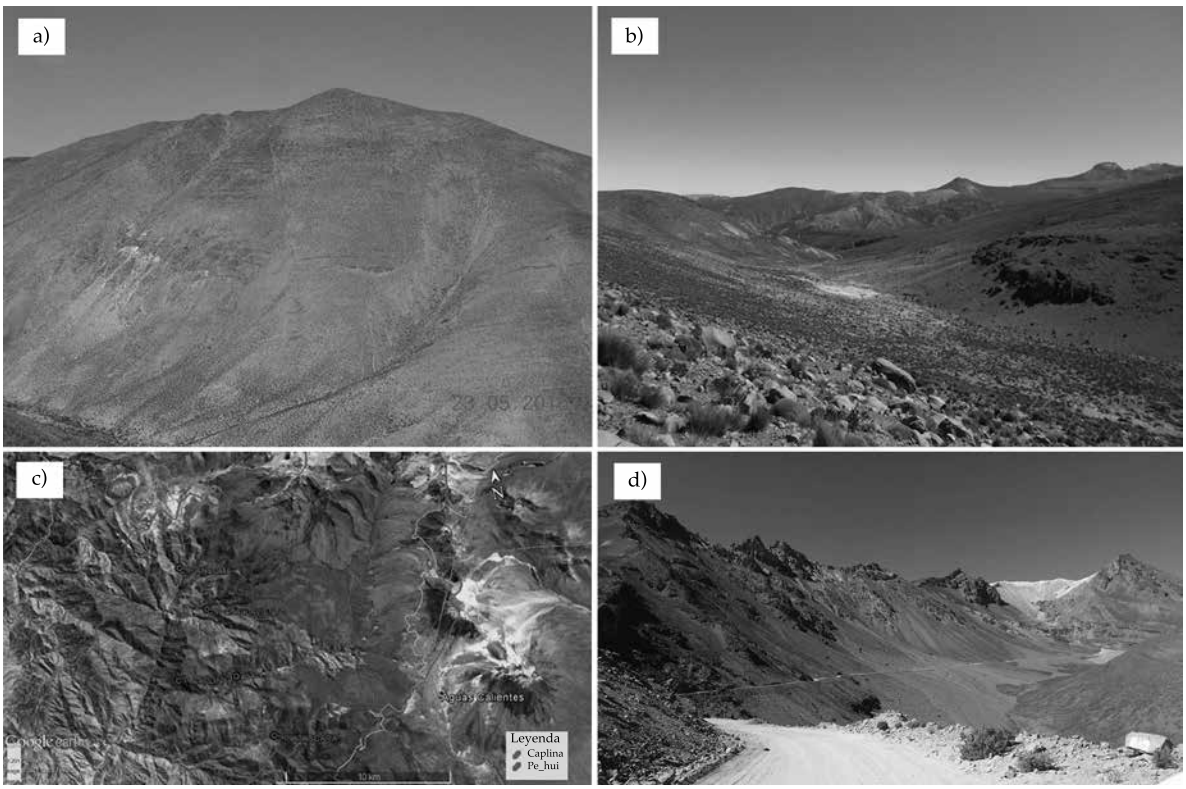

Figura 2. a) Formación Pelado en el cerro Pelado ubicado al este del río Caplina. Esta formación es cruzada por la falla regional Incapuquio; b) alteraciones hidrotermales en el volcánico Huilacollo; c) vista panorámica (*Google Earth*), la zona representa al volcánico Huilacollo; d) quebrada Paralocos, alteraciones hidrotermales del grupo Barroso, que aportan sedimentos con elementos contaminantes al agua del río Caplina.

• ISSN 0187-8336

que afloran a la base del nevado El Fraile, que consiste de clastos volcánicos, con una matriz de cenizas y lapilli (Monge & Cervantes, 2000), también presenta flujos lávicos andesíticos de color gris oscuro, que contiene minerales como plagioclasa, hornblenda, biotita y cuarzo.

f) *Depósitos cuaternarios*

Depósitos fluvioglaciares (Qh_fg): son depósitos de amplia distribución en la unidad geomorfológica Puna; al sur sobreyacen al volcánico Huilacollo y hacia el noreste a los volcánicos del grupo Barroso, formando planicies suavemente onduladas. Su litología está compuesta de bloques polimícticos (volcánicos) mal clasificados, en una matriz de grava y arena. Estos depósitos se encuentran en gran parte en las quebradas Piscullane, Aruma y Paralocos (figuras 3b y 3c).

Depósitos de Morrena (Qh_mo): están conformados por material volcánico triturado o cantos subangulares de roca volcánica provenientes del grupo Barroso y han sido transportados hasta una distancia mayor a 6 km, con afloramientos alargados, caracterizados típicamente por crear valles en forma de "U". Se ubican en las inmediaciones de los estratos volcánicos del Fraile y el Complejo fisural Barroso (figura 3d).

Depósitos coluviales (Qh_co): presentan una morfología suave de lomadas, que forman especies de anfiteatros con escarpas muy altas y casi verticales; la mayor parte de estos depósitos se han formado por derrumbes de la formación Moquegua. Su litología está compuesta por bloques muy grandes de tobas riolíticas y bloques diversos mezclados en forma caótica con una matriz de arenas y limos provenientes del mismo material. Estos depósitos representan menos del 1% en superficie de la zona de estudio.

Depósitos de bofedales: compuesto por arenas, cenizas y arcillas que contienen además materia orgánica; se caracterizan principalmente porque son reservorios naturales de aguas en las zonas altas (figura 4a). Dentro de estas unidades se han observado numerosos aniegos

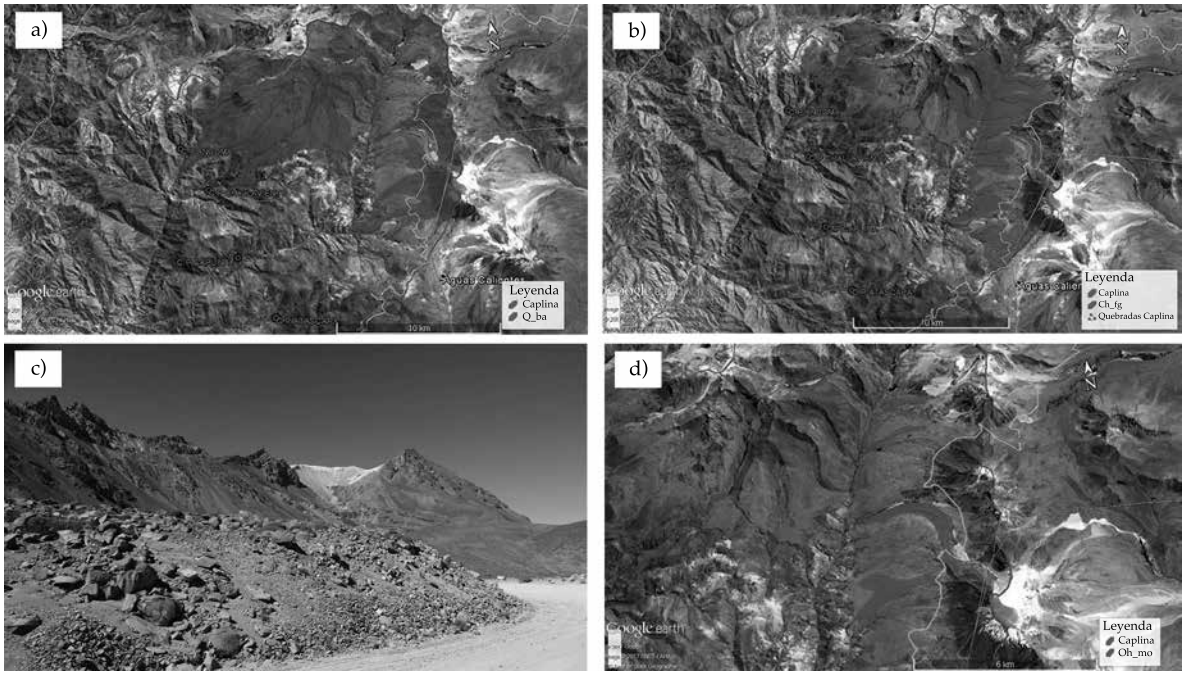

Figura 3. a) Vista panorámica de *Google Earth*: extensión del grupo Barroso dentro del límite de la cuenca; b) y c) vista panorámica de *Google Earth*: zona de depósitos fluvioglaciares; d) vista panorámica de *Google Earth*: zona de depósitos morrena.

ISSN 0187-8336 •

y surgencias de varios manantiales de agua de buena calidad y de manantiales termales. Tales depósitos representan menos del 1% en superficie de la zona de estudio.

Depósitos fluviales (Qh_fl): conformados por cantos rodados y gravas redondeadas a subredondeados con matriz arenosa, se encuentran en pleno proceso de transporte y deposición, acarreados por los ríos y avenidas de agua temporales. Estos depósitos se encuentran en el piso de valle de la quebrada Piscullane, y en el curso principal del río Caplina y la mayoría en el cauce de los ríos.

g) *Rocas intrusivas*

Unidad intrusiva Yarabamba-Cretáceo-Paleoceno: esta unidad se ubica en la unidad geomorfológica flanco disectado de los Andes y aflora en la parte baja de la cuenca Caplina (bocatoma Challata) frente a la quebrada Escalera (figura 4b); se tiene un pequeño Plutón compuesto esencialmente por granodioritas, monzodioritas y dioritas, que intruyen a las formaciones Pelado y San Francisco, silificando contactos mayormente sedimentarios (Wilson & García, 1962).

Unidad intrusiva Challaviento–Eoceno: la unidad intrusiva Challaviento se ubica geomorfológicamente en flanco disectado de los Andes y una pequeña área en la unidad geomorfológica Puna. Presenta una orientación general noroeste-sureste y se extiende desde los alrededores del poblado de Ataspaca hasta unos 12 km al noroeste del poblado Ancoma (Wilson & García, 1962). Alcanza una longitud aproximada de 45 km. Está formado por una serie de plutones que presentan las mismas facies y, además, registran dataciones en algunos de ellos que indican edades similares.

Geología estructural

El área de estudio está situada en la margen continental donde desciende la placa de Nazca debajo de la placa continental. La subducción que comenzó en el Mesozoico y continúa hasta la actualidad es responsable de la actividad volcánica y del hidrotermalismo asociado con la zona de estudio (Steinmuller & Zabala, 1997). En las áreas con hidrotermalismo contemporáneo afloran rocas sedimentarias y volcánicas pertenecientes tanto a unidades Mesozoicas como Cenozoicas.

El contexto estructural está caracterizado por lineamientos con rumbo noroeste hacia suroeste (Dirección Andina), relacionados con los emplazamientos de los principales aparatos volcánicos. La subducción de la placa de Nazca con la placa continental, la formación y ascensión de magmas generó elevados flujos térmicos en la corteza terrestre. Inducida por el calor, el agua en los acuíferos conveccionaron y dieron origen a la actividad hidrotermal. Actualmente esta actividad se manifiesta en superficie por manantiales calientes, como se tiene en las quebradas Aruma y Paralocos. Anteriormente, la actividad hidrotermal formó las vetas epitermales de metales preciosos y básicos, los yacimientos de azufre y los depósitos de boratos.

En el entorno de la zona de estudio se presenta el sistema de fallas Incapuquio, siendo uno de sus ramales la falla Challaviento, la cual generan la presencia de los manantiales de Aruma y Paralocos.

La actividad tectónica ha generado una serie de fallas, como el sistema de fallas Incapuquio; además, esta falla regional generó la presencia de una serie de fallas subsidiarias y lineamientos de dirección NE-SW en la quebrada Piscullane, N-S entre las quebradas Chillahuani y Achacahua, donde se han emplazado una serie de quebradas como Piscullane, Chillahuani, Achacahua; además, provocó la presencia de zonas de mineralización y la presencia de campos geotermales que emanan agua con alto contenido de azufre y arsénico; estas fuentes geotermales tienen la mayor influencia sobre la calidad del agua. En la figura 4c se observa el esquema de la subducción de la placa de Nazca con la placa continental.

La Carta Geológica Nacional establece que la falla principal en la zona de estudio es la falla Incapuquio (Wilson & García, 1962). Una de

• ISSN 0187-8336

las consecuencias de la complejidad tectónica que presenta este sistema de fallas es que individualiza y reúne aspectos que son conspicuos en la litoestratigrafía de los sectores específicos, haciendo aflorar formaciones geológicas que tienen aporte con elementos tales como arsénico, hierro, azufre y otros elementos que alteran la composición del agua proveniente de la cordillera (Jacay, Sempere, Hugson, & Pino, 2002). Esta cuenca tiene como basamento en gran parte rocas volcánicas y sedimentarias; aparte se encuentra una fuente geotermal ubicada en la unidad geomorfológica Puna, razón por la cual la calidad del agua se ve influenciada por elementos contaminantes de forma natural. En la figura 4d se observa la falla Incapuquio.

Entre el tramo ubicado entre Ticana y la quebrada Caplina también se presenta la falla Challaviento, que corta la formación Junerata en el sector del centro poblado Ancoma; la formación Pelado cerca de la quebrada Charine; la formación Huilacollo en las quebradas Tirata y Achacahua, afluentes de la quebrada Caplina, presentando un movimiento sinestral y de tipo inverso, lo cual permitió que afloraran las rocas pertenecientes a la unidad Challaviento sobre las rocas volcánicas del grupo Toquepala. Esta falla produce pliegues recumbentes, fallas menores y material triturado, haciendo que la erosión fluvial sea más fácil, debido a que las rocas están fragmentadas. La falla Challaviento es una falla inversa (figura 5a).

También se puede observar un lineamiento principal que tiene una dirección NE-SO, ubicado entre Pallata y la desembocadura de la quebrada Ataspaca. Este lineamiento se extiende desde la costa peruana hasta la Cordillera Occidental; está ubicado principalmente en el curso principal de río Caplina, lo que ha generado valles angostos con pendientes pronunciadas y laderas empinadas que en muchos casos son difíciles de acceder. Además, se logran observar fallas normales lístricas, con bloque de material volcánico del grupo toquepala, desplazados al

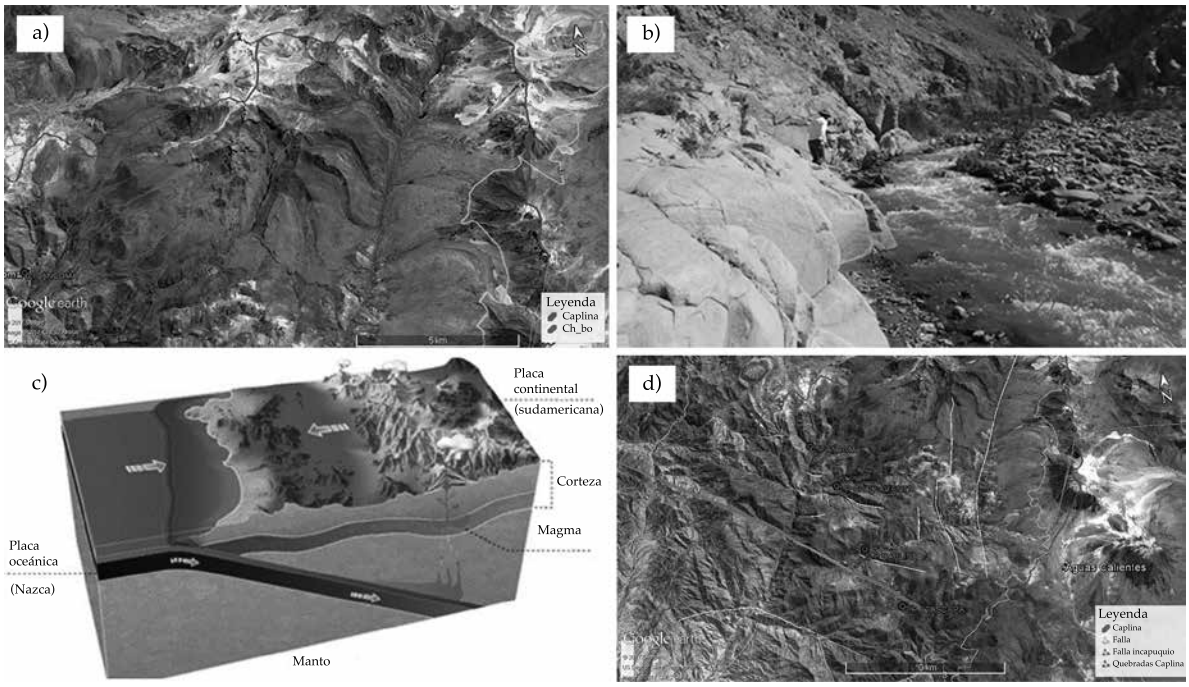

Figura 4. a) Vista panorámica de *Google Earth*, se observan depósitos de bofedales; b) rocas granodioritas de la unidad intrusiva Yarabamba; c) esquema de la subducción de la placa continental y la placa de Nazca; d) falla regional Incapuquio.

ISSN 0187-8336 •

fondo de la quebrada a ambas márgenes del río Caplina.

Geomorfología de la cuenca

El área de estudio se ubica geomorfológicamente en tres unidades morfoestructurales, como la Cordillera Occidental, Puna y Flanco disectado de los Andes (figura 10). La Cordillera Occidental es la unidad geomorfológica más alta, contiene numerosos eventos volcánicos y delimita la cuenca Caplina con la cuenca Maure.

Unidad geomorfológica Cordillera

Esta unidad geomorfológica presenta una orientación preferencial NO-SE y está limitada hacia el suroeste por la ladera oeste de la Cordillera Occidental. Localmente presenta algunos cambios en su orientación, donde los nevados Churivicho, Achacollo y Chila forman una cadena de nevados con orientación N-S, denominados como Barroso; asimismo, la cadena de nevados El Fraile y Huancune tienen la misma orientación.

En esta unidad geomorfológica es donde se produce la precipitación y se genera escorrentía. Debido a que esta unidad geomorfológica presenta pendientes muy altas, la escorrentía superficial erosiona las rocas del grupo Barroso y después estos sedimentos son transportados aguas abajo, donde se da en proceso de disolución de los elementos en el agua (figura 10).

Los nevados presentan aparatos volcánicos que se ubican por encima de los 4 000 msnm hasta alcanzar los 5 742 msnm. Las partes más altas corresponden a la Cordillera del Barroso. En general, esta unidad geomorfológica presenta un relieve muy accidentando, con pendientes fuertes, quebradas profundas y angostas, por lo que es difícil el acceso. Esto se debe a la intensa actividad tectónica de la subducción de la placa de Nazca con la placa continental. El flanco este de los nevados de Barroso y El Fraile presenta una extensa cubierta de depósitos aluviales y glaciares típicos de zonas altas (figura 5b). Estas zonas son amplias y semiplanas, y están ubicadas en la vertiente de la Cordillera Occidental, donde se muestra como una franja situada al extremo noreste del cuadrante IV del cuadrángulo de Palca hoja (36 X).

Unidad geomorfológica Puna

En esta unidad geomorfológica se encuentran las formaciones geológicas Huilacollo, la unidad intrusiva Challaviento y depósitos fluvioglaciares. Está cubierta por Ichu, y se ubica entre las cota de 3 800 y 4 500 msnm, en las cuales se presentan valles poco profundos, erosionados por los ríos provenientes de la cordilleras (figura 5c); las aguas circulan parcialmente en los talwegs (escurrimiento superficial e hipodérmico).

Esta unidad geomorfológica se encuentra en la cuenca húmeda (figura 10). La velocidad de flujo de escorrentía disminuye al pasar por esta unidad geomorfológica, por lo que el agua en esta zona tiene mayor contacto con las litofacies de la formación Huilacollo, constituidas por brechas andesíticas, tobas dacíticas y riodacíticas; parte de esta formación presenta zonas de alteración hidrotermal que influye sobre la calidad de agua. Es de vital importancia mencionar que en esta unidad geomorfológica hay fuentes geotermales, como Aruma y Paracolos, que tienen mayor influencia sobre la calidad del agua (figura 5d).

Unidad geomorfológica flanco disectado de los Andes

Esta unidad geomorfológica se ubica entre 2 000 y 4 000 msnm. El agua circula en una topografía muy diferenciada, cuyas pendientes medias son de un 28%, lo que brinda condiciones favorables al escurrimiento del agua. Presenta una topografía abrupta. Se caracteriza por un terreno accidentado con predominio de pendientes fuertes. La característica más notable de esta unidad geomorfológica es la erosión producida por los principales ríos, que han labrado valles profundos y encañonados. Las profundidades promedio de los valles varía entre 100 y 500 m, como el valle Caplina, aguas arriba de Challa-

• ISSN 0187-8336

tita. El gradiente de los valles dentro de la zona de cañones es alto y variable: Caplina (curso inferior) en un 5% y Caplina (curso superior) en un 8% (figura 5e).

Los principales factores son el levantamiento rápido del bloque andino durante el Plio-Pleistoceno y aumento del caudal de río durante el Cuaternario, dando como resultado una erosión muy rápida y el desarrollo de los grandes valles y cañones que actualmente caracterizan el flanco andino (figura 5f).

Parámetros geomorfológicos de la cuenca

La cuenca hidrográfica Caplina se encuentra en las siguientes unidades geomorfológicas: flanco disectado, Puna y la Cordillera. Puesto que los cauces presentan una geomorfología no uniforme, con pendientes comprendidas entre 1 hasta mayores de 35°, se clasifican como pendientes muy bajas, baja, media y pendiente alta, las cuales han sido producto de la intensa actividad tectónica (fallas geológicas en la zona). Estos

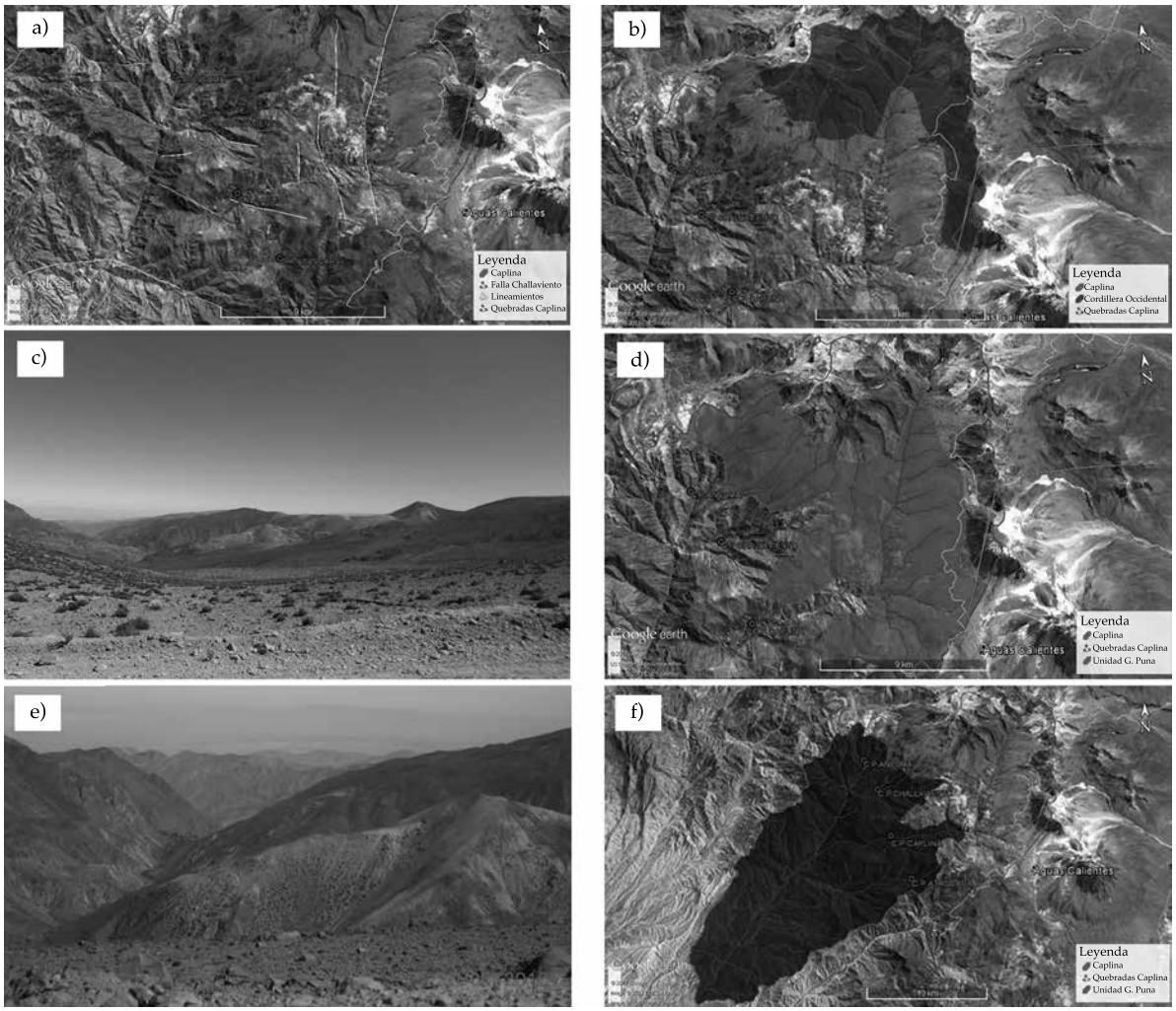

Figura 5. a) Falla inversa Challaviento; b) vista satelital de *Google Earth*, donde se puede apreciar la unidad geomorfológica Cordillera Occidental; c) vista panorámica de la unidad geomorfológica Puna; d) vista panorámica de *Google Earth*, que muestra la unidad geomorfológica Puna; e) vista panorámica del flanco disectado de los Andes, inicio del río Caplina; f) vista panorámica, donde se puede observar la unidad geomorfológica flanco disectado de los Andes.

ISSN 0187-8336 •

parámetros geomorfológicos de la cuenca son muy importantes para definir las características de la cuenca, en relación con las formaciones geológicas dentro de la divisoria de la cuenca, la hidrología, la intensidad de la actividad erosiva, la facilidad de la erosión fluvial y el transporte de sedimentos, que posteriormente definirá los componentes disueltos en el agua. En el cuadro 2 se muestra un resumen de los parámetros geomorfológicos de la cuenca Caplina; en el cuadro 3 y la figura 6 se tiene la curva hipsométrica en forma tabulada y gráfica, respectivamente.

Cuadro 2. Parámetros geomorfológicos de la cuenca Caplina.

Parámetros geomorfológicos		Simbología	Unidades	Cuenca Caplina
1. Código PFAFSTETTER		-	-	-
2. Superficie o área		A	km²	502.00
3. Perímetro		P	km	116.00
4. Forma de la cuenca	4.1. Coeficiente de compacidad	Kc	-	1.45
	Observación	-	-	Oval redonda
	4.2. Relación de elongación	Re	-	0.61
	Observación	-	-	Relieves fuertes, con pendientes pronunciadas
	4.3. Factor de forma	Kf	-	0.29
	Observación	-	-	Forma rectangular o alargada
5. Características de relieve	5.1. Rectángulo equivalente	L	km	-
	5.2. Curva hipsométrica	-	-	Joven
	5.3. Elevación media	Em	msnm	3 555.50
	5.4. Pendiente media	Sc	%	28.21
	5.5. Pendiente media del cauce principal	Sm	%	6.19
	5.6. Pendiente media ponderada del cauce principal	Sp	%	-
6. Características de la red de drenaje	6.1. Orden de corrientes	Oc	-	5
	6.2. Relación de bifurcación	Rb	-	-
	6.3. Densidad de drenaje	Dd	km/km²	0.90
	6.4. Frecuencia de corrientes	Fc	km^{-2}	-

Cuadro 3. Curva hipsométrica.

Núm. de orden	Cota mín	Cota máx	Área parcial (km²)	Área acumulada (km²)	Área que queda sobre la superficie (km²)	Porcentaje de área entre CN	Porcentaje de área sobre CN
1	1 561	2 000	13.03	13.03	499.57	2.61%	100.00%
2	2 000	3 000	121.44	134.48	486.54	24.31%	97.39%
3	3 000	4 000	157.09	291.56	365.09	31.44%	73.08%
4	4 000	5 000	179.42	470.98	208.01	35.91%	41.64%
5	5 000	5 550	28.59	499.57	28.59	5.72%	5.72%
			500.00			100%	

• ISSN 0187-8336

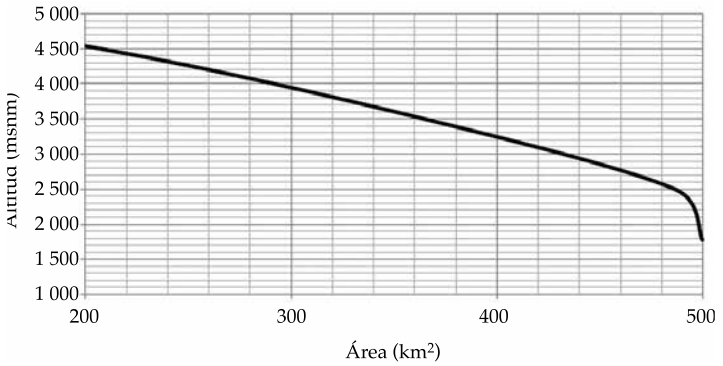

Figura 6. Curva hipsométrica de la cuenca Caplina en el punto de control bocatoma Challata.

Resultados y discusión

El área involucrada en la zona de estudio se distribuye en las siguientes unidades geomorfológicas: Cordillera, 14%; Puna, 25%; flanco disectado de los Andes, 61% (figura 7a). Dichas unidades geomorfológicas son generadas por los procesos de subducción debido a la interacción entre las placas de Nazca y continental. Siendo el relieve uno de los factores principales para la meteorización de las rocas, además del clima (semidesértico) y la propia resistencia de los minerales que representan suma importancia en el predominio de las áreas de mayor pendiente.

Unidad geomorfológica Cordillera

En la unidad geomorfológica Cordillera se presentan pendientes que superan los 25° (figura 12), de tal forma que el agua procedente de la lluvia de verano circula en mayor porcentaje por escurrimiento superficial; una parte se evapora y sólo una pequeña parte se infiltra a través de las fracturas de las rocas andesíticas del grupo Barroso; parte de esta formación se encuentra alterada y posteriormente aflora al pie de los aparatos volcánicos debido a la presencia de domos volcánicos de edad Pleistocénica. Esta unidad geomorfológica constituye una zona regularmente favorable para el abastecimiento de agua, pero en forma limitada, pues las precipitaciones varían de 200 a 350 mm/año (figuras 7b y 7c). En los años húmedos, el agua de deshielo también escurre con pocas pérdidas y de acuerdo con la latitud donde se ubica la zona de estudio existen pérdidas por sublimación, que en la actualidad no se han determinado.

Las rocas andesíticas en esta unidad geomorfológica constituyen un 60% en área y el resto está conformado por traquitas de los domos volcánicos y los depósitos fluvioglaciares, morrenas y coluviales. Químicamente, las rocas andesitas y traquitas se consideran como rocas intermedias, ya que contienen un poco más de 54.5% de sílice y óxido alumínico en un 16.4%.

En este relieve montañoso, la erosión física causa transporte rápido de los fragmentos de las rocas, lo cual provoca que en un tiempo reducido se dé la desintegración química completa; este proceso se limita a los cauces de los ríos y quebradas principales, donde los clastos son transportados por el agua; calcio y sodio son transportados; por tanto, la meteorización química es poco relevante. Existe un punto de monitoreo de calidad de agua y según los registros, el pH del agua es 4.2 (ácido); concentración de calcio, 241.3 mg/l; aluminio, 47.2 mg/l; hierro, 12.1 mg/l, y manganeso 1.18 mg/l, los cuales están por encima del estándar de calidad ambiental (ECA) para categoría 3, estándar establecido para riego de vegetales y bebida de animales (figura 7d).

ISSN 0187-8336 •

Unidad geomorfológica Puna

Presenta una morfología llana y ondulada (figura 12). Existen valles poco profundos erosionados por los ríos Pachaza, Toquela, Chillahuani y Piscullane provenientes de la Cordillera. En esta unidad, las aguas discurren en el fondo de los ríos y quebradas por escorrentía superficial y otro porcentaje en forma subterránea a modo de circulación hipodérmica en los flancos de los valles y los interfluvios a través de los depósitos detríticos tipo coluvial y coluvio-deluvial. Está conformado principalmente por rocas del grupo Barroso, formación Huilacollo, con una cobertura de depósitos aluviales, glaciares y eluviales. Litológicamente, el grupo Barroso está conformado por andesitas, traquiandesitas y dacitas (plagioclasas), estas formaciones geológicas se encuentran a su vez intruidas por rocas subvolcánicas de andesitas porfiríticas (plagioclasas), que forman domos relacionados directamente con la actividad geotermal de la zona, localizada principalmente en los sectores de Paralocos y Aruma. La intrusión ha generado zonas de alteración en la roca (figura 8a), donde se encuentran depósitos de minerales importantes para su explotación. Las zonas de alteración mineralógica, al ser meteorizadas y luego arrastradas a manera de arroyada difusa, permiten la disolución de tales elementos químicos en el agua.

En esta unidad geomorfológica se han ubicado hasta dos fuentes de actividad geotermal: en las quebradas de Paralocos y Aruma, que emanan agua a altas temperaturas, con presencia de elementos químicos contaminantes, como azufre, boro y arsénico (figura 8b).

Según los registros de monitoreo de calidad de agua realizados por ANA en el año 2011, estas fuentes geotermales presentaron un valor

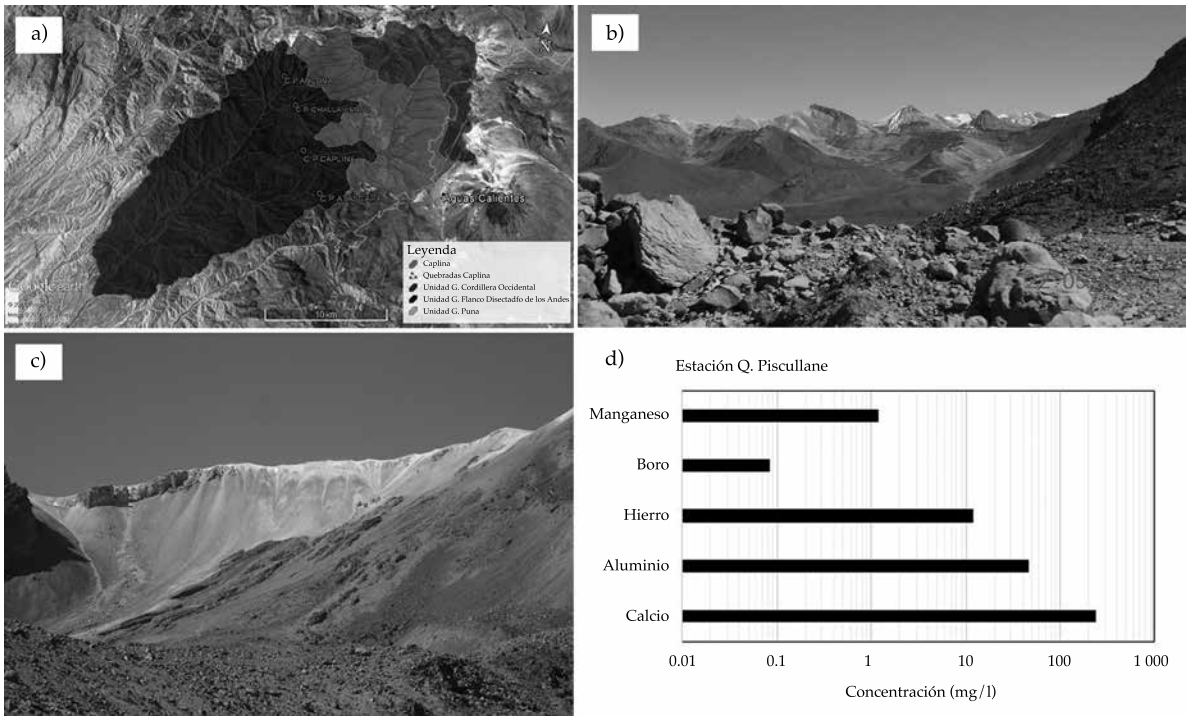

Figura 7. a) Vista panorámica de *Google Earth*, donde se pueden apreciar las unidades geomorfológicas por donde discurren las aguas del río Caplina; b) zona de alteración del grupo Barroso en las nacientes de la Quebrada Piscullane; c) zona de alteración en nevado El Fraile y nacientes de la quebrada Paralocos; d) concentración de elementos en las aguas de la quebrada Picullane.

• ISSN 0187-8336

alto de concentración de arsénico (1.43 mg/l), hierro (64.80 mg/l), y pH ácido (1.84), a diferencia de otras quebradas omo Ancoma y Toquela (figuras 8c, 8d y 8e).

De acuerdo con información histórica (comunicación personal con gente del lugar), en el año 1823, los agricultores del valle de Tacna trasvasaron desde la cuenca del río Sama hacia la cuenca del río Caplina, con un caudal aproximado de 130 l/s de las fuentes Picutani, Barroso Chico y Barroso Grande, a través de un canal de trasvase hacia la quebrada Ancoma, afluente del río Caplina; se debe indicar que el río Tarucachi también presenta zonas con actividad geotermal, donde el elemento químico predominante es el hierro. En la actualidad, el trasvase corresponde solamente a las fuentes de Barroso Chico, con un caudal aproximado de 70 l/s, y alto contenido de hierro (figura 8f).

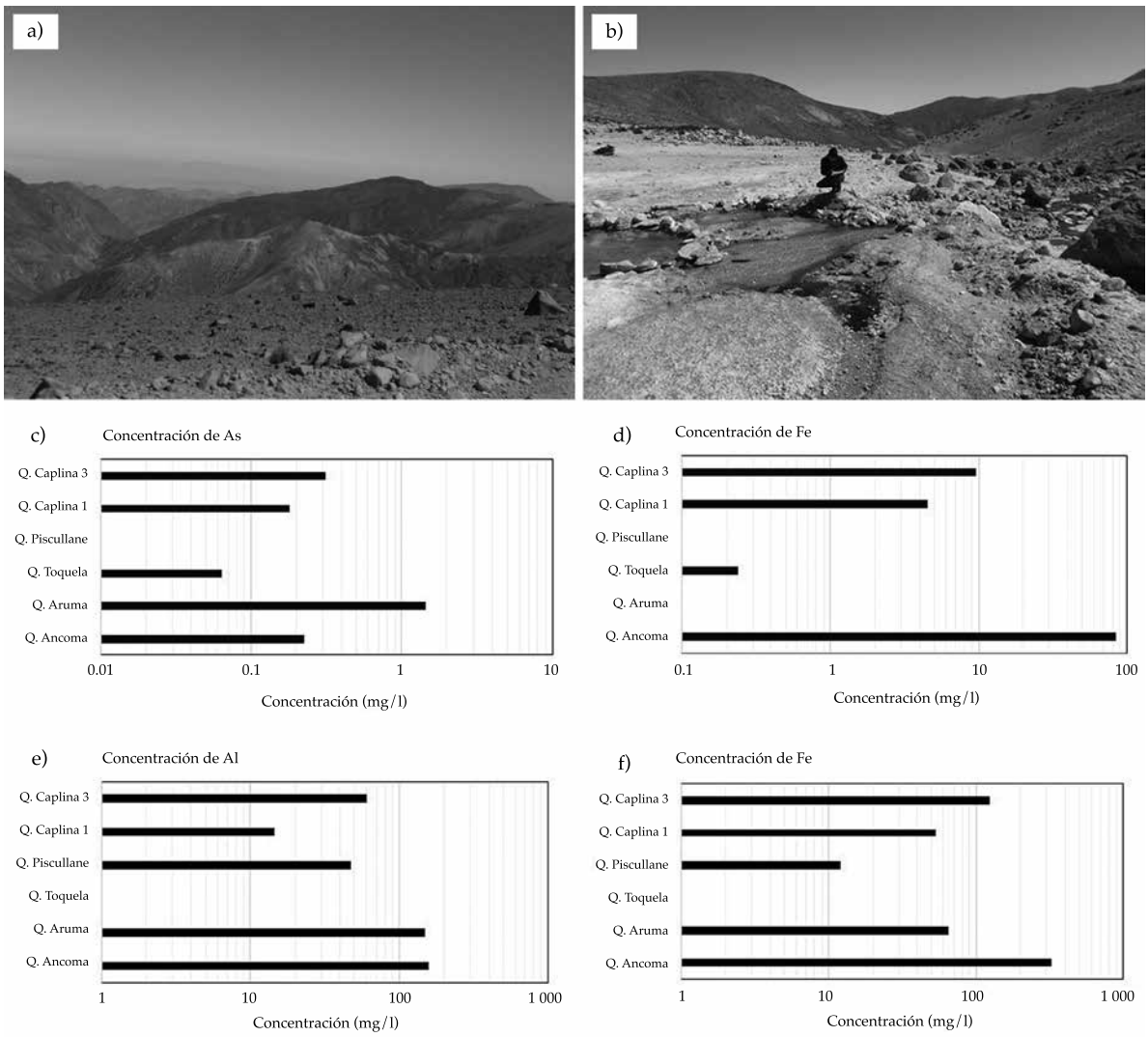

Figura 8. a) Zona de alteración hidrotermal del volcánico Huilacollo; b) fuente geotermal Aruma; c) concentración de srsénico en diferentes fuentes geotermales y puntos de control; d) concentración de hierro en diferentes fuentes geotermales y puntos de control; e) concentración de aluminio en diferentes fuentes geotermales y puntos de control; f) contenido de hierro en diferentes fuentes geotermales y puntos de control, año 2014.

ISSN 0187-8336 •

Unidad geomorfológica flanco disectado de los Andes

La poca cantidad de agua que llega al flanco disectado de los Andes en la cuenca del río Caplina —entre 2 000 y 3 800 msnm— discurre en los lechos que presentan altas pendientes, con laderas de pendiente media a alta entre 25 y 65° (figura 12). En esta unidad geomorfológica normalmente las precipitaciones se dan hasta la cota 3 500 msnm, alcanzando valores entre 70 y 150 mm/año, lo cual produce escorrentía superficial a manera de huaycos debido a la pendiente y a la disponibilidad de material alterado (depósito eluvial); sólo en años muy húmedos las precipitaciones alcanzan valores de 300 mm/año.

Geológicamente, esta unidad geomorfológica está constituida por las formaciones Junerata, Ataspaca, Pelado y Toquepala, con depósitos de edad Cuaternaria; litológicamente, las formaciones y grupos están constituidos por tobas riodacíticas, cuyo componente principal es el feldespato alcalino, que presenta concentración de hierro y boro, además de presentar pH ácido.

Dentro de esta unidad geomorfológica se cuenta con cuatro estaciones de monitoreo de calidad de agua, denotadas como Q. Ancoma, Q. Toquela, Q. Caplina 1 y Q. Caplina 3; esta última estación se ubica a unos 50 m aguas arriba de la bocatoma Challata.

Según los resultados de monitoreo de calidad de agua reportada por ANA de la estación ubicada en la Quebrada Ancoma, el agua presenta alto contenido de hierro (324.37 mg/l en 2011; 222.7 mg/l en 2012, y 84.73 mg/l en 2014). Esta variación de concentración se debe a que los muestreos se llevaron a cabo en distintas estaciones del año (octubre de 2011, diciembre de 2012 y abril de 2014).

El alto contenido de hierro se debe al trasvase de agua por el canal Barroso, que proviene de la zona con actividades geotermales, en la cual el elemento predominante es el hierro; además, se observa que la concentración en años húmedos disminuye, en estiaje aumenta y presenta un pH ácido (3.17). Según los resultados del monitoreo de calidad de agua, las concentraciones de los elementos varía en las diferentes estaciones del año, tal como se obtuvo en los resultados de monitoreo realizados en los años 2011, 2012 y 2014 (octubre de 2011, diciembre de 2012 y abril de 2014); es decir, que en temporadas de lluvia (verano), la concentración de arsénico, aluminio, hierro y de otros elementos disminuye por la dilución, y en temporadas de estiaje (invierno), las concentraciones de los mismos elementos aumenta (cuadros 1a y 1b), indicativo directo de su relación de dilución con el caudal del río. En las figuras 9a, 9b, 9c, 9d, 9e y 9f se muestran las concentraciones de arsénico, boro, hierro y aluminio, las cuales varían debido a que los muestreos se hicieron en distintos meses del año.

Para referirnos a la precipitación, se consideró como referencia la estación de Paucarani de la cuenca Uchusuma, debido a que la precipitación generalmente se produce en la Cordillera y la Puna con mayor frecuencia en verano. Según los registros de Servicio Nacional de Meteorología e

Cuadro 1a. Concentración de elementos contaminantes en el agua en periodo de estiaje en la cuenca Caplina.

	ECA (Cat. 3)	Afluentes de la cuenca Caplina					
		Quebrada Piscullane	Quebrada Aruma	Quebrada Ancoma	Quebrada Toquela	Quebrada Caplina 1	Quebrada Caplina 3
pH	6.5 - 8.4	4.2	1.84	2.7	-	3.11	3.51
Arsénico (mg/l)	0.05	-	1.434	0.2242	0.0638	0.1807	0.31
Hierro (mg/l)	1	12.1	64.773	324.368	-	5.254	124.67
Aluminio (mg/l)	5	47.190	148.70	157.248	-	14.49	60.84

Fuente: Autoridad Nacional del Agua.

• ISSN 0187-8336

Cuadro 1b: Concentración de elementos contaminantes en el agua en período de avenidas en la cuenca Caplina.

	ECA (Cat. 3)	Afluentes de la cuenca Caplina					
		Quebrada Piscullane	Quebrada Aruma	Quebrada Ancoma	Quebrada Toquela	Quebrada Caplina 1	Quebrada Caplina 3
pH	6.5-8.4	3.71	-	2.94	8.22	3.13	3.84
Ce (µs/cm)	2 000			2 670	796.6	1 258	2 670
Arsénico (mg/l)	0.05	-	1.434	0.0102	0.027	0.122	0.0549
Hierro (mg/l)	1	-	64.773	84.733	0.24	4.953	9.549
Aluminio (mg/l)	5	-	148.70	79.378	0.0883	12.039	14.415

Fuente: Autoridad Nacional del Agua.

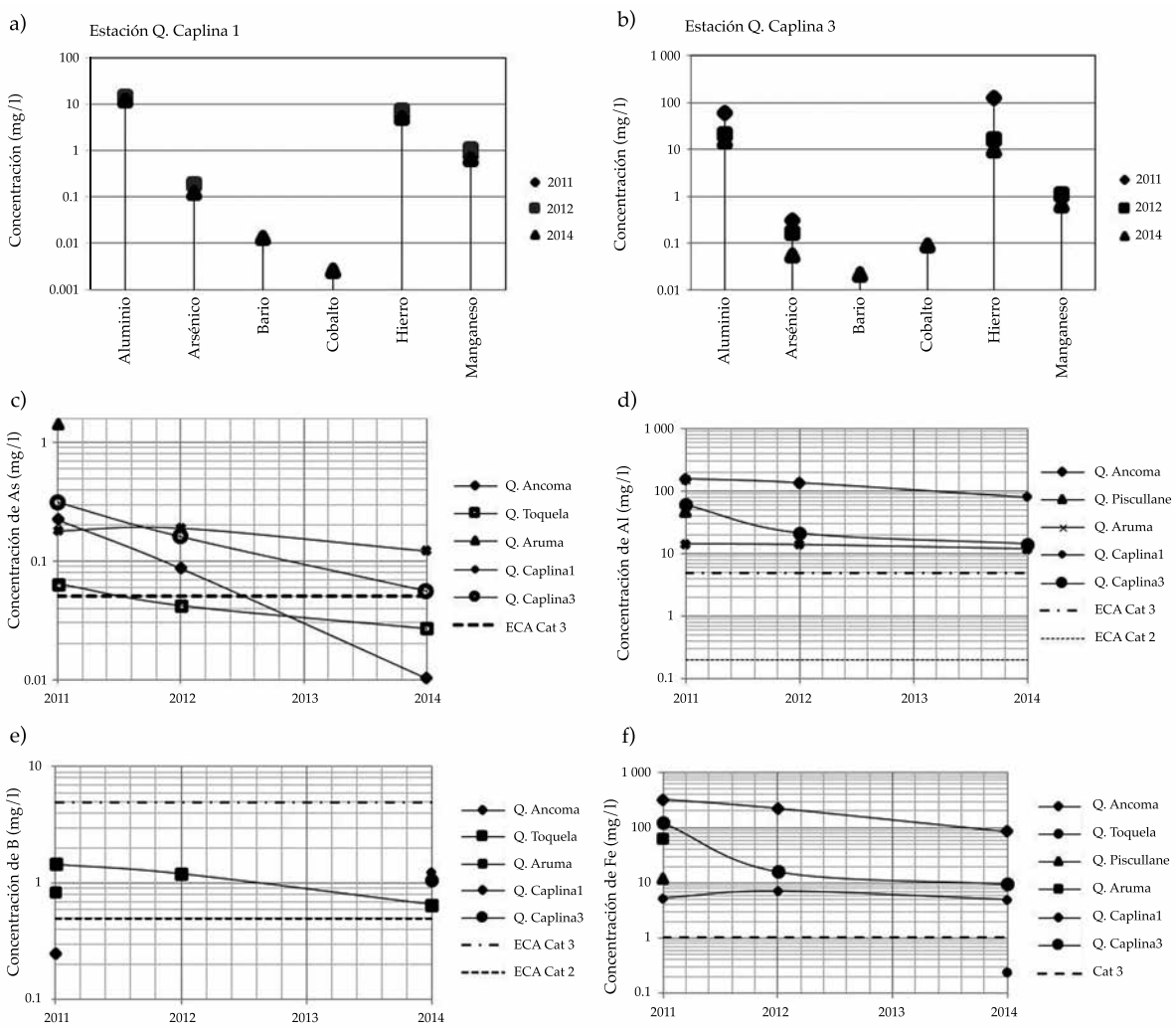

Figura 9. a) Concentraciones de aluminio, arsénico, hierro y manganeso en la estación de Q. Caplina 1; b) concentración de aluminio, arsénico, hierro y manganeso en la estación Q. Caplina 3 (punto de control de la zona de estudio); c) concentraciones de arsénico; d) concentraciones de aluminio; e) concentraciones de boro; f) concentraciones de hierro.

ISSN 0187-8336 •

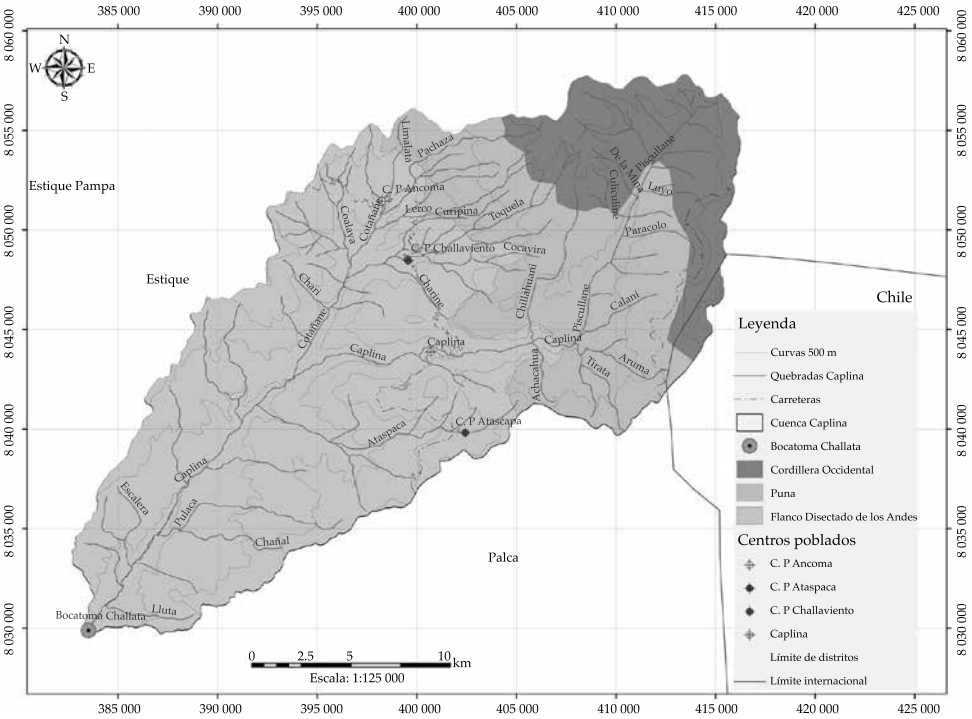

Figura 10. Mapa geomorfológico.

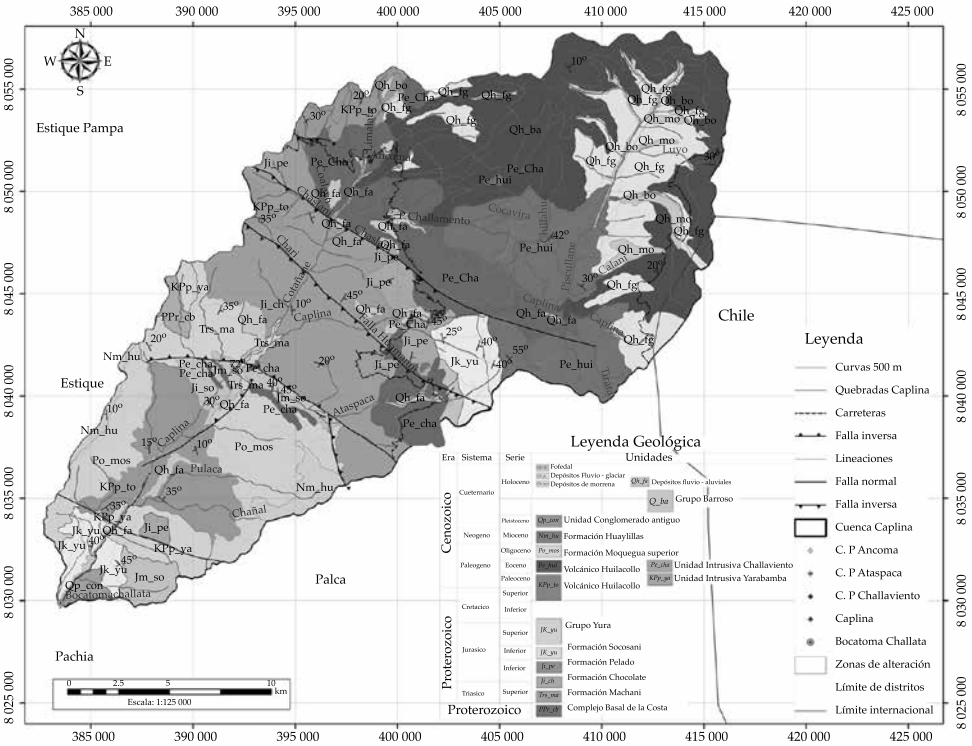

Figura 11. Mapa geológico.

• ISSN 0187-8336

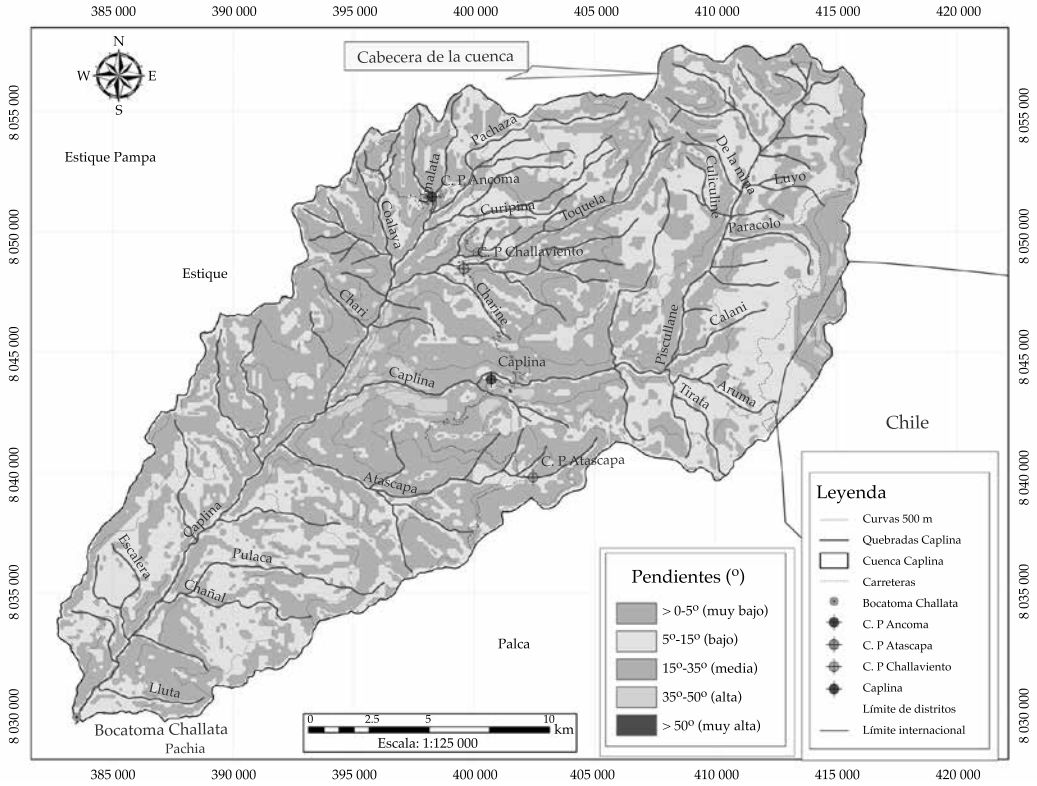

Figura 12. Mapa de pendientes.

Hidrología (SENAMHI, 2012), en diciembre del mismo año se registraron 89 mm/mes (inicio de las lluvias) y en abril de 2014 se registraron 40.8 mm/mes; el mes de abril corresponde al periodo de recesión o término de lluvias. Esto indica que la concentración tanto del arsénico, boro, hierro y aluminio fueron diluidos durante los meses de enero, febrero y marzo.

Conclusiones

Se identificaron tres unidades geomorfológicas principales sobre las cuales discurren las aguas generadas por las precipitaciones en la cabecera de la cuenca Caplina. El análisis geomorfológico permitió explicar que la Cordillera Occidental presenta pendientes altas, donde el agua, debido a las lluvias en el verano, circula en mayor porcentaje por escurrimiento superficial, erosionando las rocas andesíticas del grupo barroso; inclusive estas rocas se encuentran alteradas y por tal razón la cantidad de sedimentos es mayor y se transporta por el agua de manera recurrente. En la unidad geomorfológica Puna se identificaron quebradas poco profundas, como Piscullane, Paraloco, Aruma, Chillahuani, Pachaza y Toquela, en las que la velocidad de flujo disminuye, de manera que el agua tiene mayor contacto con las rocas del grupo Barroso y la formación Huilacollo. La unidad geomorfológica flanco disectado de los Andes presenta quebradas profundas y pendientes altas de manera que la velocidad de flujo incrementa y adquiere mayor acción erosiva sobre las rocas fracturadas de la unidad intrusiva Challaviento y la formación Junerata. Las precipitaciones alcanzan entre 70 y 150 mm/año, y en años húmedos llegan a los 300 mm/año.

Según la cartografía geológica se identificaron las formaciones que inciden sobre la calidad

ISSN 0187-8336 •

de agua en la cuenca Caplina, tal como el grupo Barroso, constituido por rocas andesíticas y dacíticas con alto contenido de hierro; en tanto que la formación Huilacollo estuvo constituida por brechas andesíticas, tobas dacíticas y riodacíticas; la formación Toquepala por rocas andesíticas; la unidad intrusiva Challaviento por rocas ácidas (granodiorita y monzodiorita), y la formación Junerata, por coladas basálticas y andesitas.

Las fuentes que tienen mayor influencia sobre la calidad de agua son la fuente geotermal Aruma y Paralocos, que emanan agua con alto contenido de arsénico (1.43 mg/l), plomo (0.22 mg/l) y sodio (296.72 mg/l), las cuales presentan concentraciones por encima de los valores de eca. Otra fuente principal es el trasvase de agua de la fuente Barroso Chico hacia la quebrada Ancoma, afluente del río Caplina. Dicha fuente presenta actividad geotermal, donde el elemento predominante es el hierro. El valor de hierro obtenido en la estación de Ancoma fue de 84.73 mg/l, así como 0.22 mg/l de arsénico en épocas de estiaje y 0.01 mg/l en temporadas de lluvias; las altas concentraciones de los elementos mencionados se reflejan en los reportes de monitoreo de calidad de agua realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Del análisis de las interrelaciones entre geología, clima e hidrología se refleja la variación de la concentración de los elementos en el agua en épocas de estiaje y épocas de avenida, lo cual significa que la concentración de estos elementos contaminantes depende mucho de la precipitación: a mayor precipitación, la concentración de elementos como arsénico, boro, hierro y aluminio disminuye; dicha hipótesis fue comprobada con los resultados de monitoreo de calidad de agua realizado por Autoridad Nacional del Agua (octubre de 2011, diciembre de 2012 y abril de 2014). En la bocatoma Challata, según los reportes de calidad de agua, presenta una concentración de arsénico de 0.31 mg/l en épocas de estiaje y 0.055 mg/l en temporadas de lluvia; 124.7 mg/l de hierro en temporadas de estiaje y 9.54 mg/l en temporadas de lluvia. Dichas evidencias son marcadas por la coloración del agua.

Referencias

Acosta, H., Mamani, M., Alvan, A., & Oviedo, M. (2011). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Pacla Hoja 36-v y 36-x. *Boletín 139, Serie A, Carta Geológica Nacional*, 101.

ANA (2011). *Informe técnico 003-Calidad de agua, cuenca Caplina-Tacna.* Tacna, Perú: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.

Appelo, J., & Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution* (536 pp.). London: Balkema Publisher.

Barba, A. I. (1996). *Incidencias de las características geológicas y ambientales sobre la calidad de las aguas de los tramos superior y medio del río Arlanzon* (pp). Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Cardenas, V. L. (2016). Estrategia nacional para el mejoramiento de calidad de recurso hídrico (p. 29). ANA. Lima.

Catalan, L. J. (1981). *Química del agua* (2a ed.). Madrid: Talleres Gráficos Alonso.

Esquivez, V. V. (2014). *Informe técnico del cuarto monitoreo participativo de calidad de agua superficial en las cuencas Caplina, Maure, Uchusuma e Intercuenca 1315* (p. 119). Lima: ANA.

Garranzo, I. V. (2009). *Estudio geoquímico de suelos y agua como base para evaluar la contaminación: relación roca-suelo agua* (326 pp.). Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Jacay, J., Sempere, J., Hugson, L., & Pino, A. (2002). Características estructurales del sistema de falla incapuquio en el sur del Perú (pp. 310-321). En: *Resumen ampliado.* 5º Simposio Internacional sobre Geodinámica Andina, Toulouse, Francia.

Meybeck, M. (1996). Global changes in aquatic systems and their interelations with human health. *Pontifical Academy of Sciences, Scripta Varia, 106*, 61-111.

Monge, R., & Cervantes, J. (2000). *Mapa geológico actualizado de los cuadrángulos Pachia y Palca* (p. 37). Lima: INGEMMET.

Peña, F., Acosta, H., & Cotrina, G. J. (2009). Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Caplina Tacna. *INGEMMET, Boletín N°1 Serie H, Hidrogeología*, 141.

PET (2002). *Plan de gestión de la oferta de agua en las cuencas del ámbito del proyecto Tacna-cuenca Caplina* (255 pp.). Tacna, Perú: Asesores Técnicos Asociados, S.A.

SENAMHI (2012). Condiciones hídricas del año 2012-2013. Regiones Puno, Arequipa y Tacna. *Boletín Climático Nacional*, 2-8. Steinmuller, K., & Zabala, C. (1997). Hidrotermalismo en el sur del Perú. *Boletín 18-Serie D: Estudios Especiales INGEMMET*, 51-102.

Wilson, J., & García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca Hoja 36v y 36x. *INGEMMET-Comisión de la Carta Nacional*, 13-66.

• ISSN 0187-8336

Dirección institucional de los autores

Dr. Edwin M. Pino Vargas
Ing. Príncipe Tacora Villegas
Dr. André Steenken

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG)
Departamento Académico de Ingeniería Geológica-Geotecnia (DAGG)
Av. Miraflores s/n, cercado Tacna, Perú
Teléfono: +51 (052) 583 000, ext. 2277
epinov@unjbg.edu.pe
ptacorav@unjbg.edu.pe
asteenken@unjbg.edu.pe

Ing. Luis A. Alfaro Ravello

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG)
Departamento Académico de Ingeniería Civil (DAIC)
Av. Miraflores s/n, cercado Tacna, Perú
Teléfono: +51 (052) 583 000, ext. 2305
lalfaror@unjbg.edu.pe

Ing. Angely P. Valle Castro

Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)
Departamento de Ingeniería
Av. Universitaria 1801, San Miguel Lima 32, Perú
Teléfono: +51 (01) 6262 000
valle.angely@pucp.edu.pe

Dr. Eduardo A. Chávarri Velarde
M.Sc. David R. Ascencios Templo
Dr. Jesús A. Mejía Marcacuzco

Universidad Nacional Agraria (UNALM)
Departamento de Recursos Hídricos (DRH)
Avenida La Molina, Lima 15024, Perú
Teléfono: +51 (01) 6147 800, ext. 315
echavarriv@lamolina.edu.pe
dascencios@lamolina.edu.pe
jabel@lamolina.edu.pe